瀬戸内海地域養成ハマチの成長について

井上裕雄・田中啓陽

(1966年3月9日受理)

GROWTH OF HAMACHI, *SERIOLA QUINQUERADIATA*,
CULTURED IN THE SETO INLAND SEA AREA

Hiroo INOUE and Yoshiaki TANAKA*

For establishing the technology of pisciculture, it is necessary to be able to forecast the growth of the cultured fish. With this purpose in mind we have analyzed reliable field data concerning the average growth of the 0-year-old yellow tail (Hamachi in Japanese) cultured in fish farms located on the Seto Inland Sea coast.

If the food supply is sufficient in quantity and adequate in quality when under the normal influence of all other possible factors, the average growth rate of the cultured fishes may be given as a function of water temperature (the most potent environmental factor) and average fish size (the most fundamental biotic factor) by the following empirical relationship.

$$d\left(\frac{W}{W_{\infty}}\right)/dt = \lambda \left(1 - \frac{W}{W_{\infty}}\right) \left\{ \ln \left(1 - \frac{W}{W_{\infty}}\right)^{-1} \right\}^{\gamma}$$

where W is the average body weight at time t , W_{∞} the theoretical maximum body weight (≈ 15.8 Kg), dW/dt the growth rate, γ a constant characteristic of the species and λ depends upon the water temperature and perhaps upon the species.

In case of the 0-year-old cultured yellow tail, the value of γ was determined to be 0.167 (Fig. 1) and then the dependence of λ upon the water temperature was accounted for as shown graphically in Fig. 2.

It may be thought that the amount of fish produced in any fish farm presents the "results" brought about by the combined action of natural and artificial factors on the growth of the fishes cultured there. Accordingly, the empirical relationship above shown will also serve as a standard of comparison with which to examine the actual growth of the cultured fish and to clarify the time when or the degree in which the adverse influence of some factors exercising on the growth shows itself.

Applied to the growth rate curve of fishes cultured in some fish farms different in shape, structure, rate of water exchange and degree of crowding of fishes, these procedures reached considerable success in diagnosing the environmental conditions existing during the course of culture and in obtaining correlations from which to predict the effect of some factors on the growth (Fig. 4).

一般に、養魚場の環境について考える場合2つの方法があると思う。第1は環境を構成する水・池底などおよそ養魚上考慮すべきと思われる種々な物理・化学的要因ならびに人為的要因について総括的に調査し、既存の魚類生理・生態学に基づいて考察する方法と、第2は実際の養魚場における生産を“実験”と考え、環境諸要因の作用の結果である成長データを解析して、これから逆に環境を推察する方法である。最後にこの両者は有機的に統合されるべきことはもちろんである。第1の方法は正統であるが、錯綜した多くの要因のためかなり長期に渡る広範囲かつ総合的調査研究を必要とする。第2の方法は近道であつて簡便法といえ

* 香川大学農学部 (Fac. Agr., Kagawa Univ., Miki-cho, Kida-gun, Kagawa, Japan).

よう。

そこで、第2の方法によるとすれば、たとえ厳密さを欠くとしても、常識的に正常と認められる環境条件下での飼育魚について、成長速度(日間増重量)・日間摂餌量に対する基準を設定する必要がある。この基準はそれ自体養魚生産量の予知ならびに施設造成計画に価値あるとともに、前述のように既存養魚施設における成長・摂餌データをこれと比較対照することによりその環境の適否を診断する手掛りをあたえる。

さて、魚類は変温動物であるから水温は代謝過程の速度を変える。水温の上昇によつて基礎代謝が盛んになり、また魚が活発になるから維持食餌量が増して摂餌量が増大する。そこで給餌が量的に十分、質的に適正でありさえすれば、魚はその存在する物理・化学的条件に対して可能な最大成長を達することができる。これら物理・化学的条件の中でもっとも基本的なのは水温と溶存酸素量(D. O.)であろう。また他方、成長速度・日間摂餌量におよぼす生物学的基礎要因としては魚体の大小・年令が考えられる。

したがって、成長・投餌量・水温に関して比較的信頼のおける2, 3のハマチ養魚場の現場データと既存の水槽飼育実験データを使つて、餌料が量的に十分、質的に適正でその他の条件は“普通の状態”とみなすことができる場合について、ハマチの日間増重量・日間摂餌量・転換効率におよぼす基礎環境要因としての水温ならびに生物学的基礎要因としての魚体重(生産量を目的とするゆえ)の影響を検討して1つの基準を作製してみることにした。まず本報では成長についてのべることにする。

なお、井上⁶⁾は溶存酸素収支にもとづいて浅海養魚施設における適正収容密度を論じたが、多くの仮定やまた簡単には考慮しえない諸条件のゆえに決して満足とは言えない。これを補足することにもなろう。

資 料

畑中・高橋・村川⁴⁾の実験によれば、ブリは夜間餌をとらず、明け方から朝には1日量の半分ぐらい食べる場合が多いし、昼頃には食べ方が少なく、その後夕刻にかけて再び食べる。このことはまた一般に現場で経験されていることである。他方、石渡⁵⁾はブリに1回あたり十分量の餌を投与するとき投餌回数2~3回で最大日間摂餌量に近くなると述べている。これらを総括すると、資料を得た対象養魚場での給餌法はほぼ満足すべきものであつて、最大日間摂餌量に近い状態での給餌とみなしてよさそうである。

つぎに餌料の種類については、養成期間中にかかなり変わり、冷凍されたイカナゴ・イワシ・サバ・アジ・サンマなどを投与している。摂餌量は当然この餌飼料の種類によつて幾分変わることが予想され、畑中・村川³⁾も指摘しているが、現場成長データはそれを十分区別して分析するだけ詳細ではないので、今後の水槽飼育実験の成果をまつとして、今回は区別せず同様に扱うことにした。したがってこれら餌飼料の平均的なものである。

第3に、石渡⁵⁾は1回投餌の最大飽食量とD. O.の関係をマサバ・マアジについてしらべ、酸素飽和度70%以下では最大飽食量は低下し特に40%以下では極度に低下するという。また田村¹¹⁾によれば、マダイ・ムラサキ・クロメバルではD. O.の低下とともに呼吸量も低下するが、マアジ・ブリ・コモンフグ・アイナメではD. O.がある限度に達するまで呼吸量は低下しないと述べている。一般に呼吸量が低下し始めるときのD. O.と1回の最大飽食量が低下し始めるときのD. O.との間に相関があると予想される。これらを総合し、ブリについては酸素飽和度70%が摂餌量に対する許容限度と考えられる。原田は、D. O.が4 cc/l以上ある場合にハマチは安全であるが、3 cc/l以下になると摂餌量が少なくなり、2 cc/l以下になると死亡する危険があるという。

以上の従来の研究を考慮し、海水交流を基礎とした溶存酸素収支から判断して、結局、収容密度は過大でなく、給餌が量的に十分・質的に適正で、普通の環境条件下でハマチが健康に育成していたと思われる女木島養魚場(高松市沖合い)の'62年、樫石島養魚場(岡山県下津井沖合い)の'63, '64年の当才魚の成長データと収容密度が過大でD. O.がやや慢性的に不足し成長が不良であつたと推定される樫石島養魚場の'62年のデータを使用することにした。両養魚場の説明については文献7), 8)を参照されたい。

当然のことながら、サンプリング誤差(日日のサンプル数は明確でない)が大きく、また餌飼料の種類・

鮮度や生理上から生じる魚自体の日日の摂餌量の変動のため、毎日測定した粗資料としての平均魚体重は信頼性にとぼしい。そこで約 10 日毎に平均して、これをその中間の日における魚群を代表する個体魚の体重とみなすように再整理した。以上の前処理で得たものを資料として日間増重量（成長速度）を通常の方法で求めた。

水温の測定は女木島では朝・昼・夕の 3 回、樫石島では 1 日 1 回であるが、いずれも時刻がかなりまちまちで欠測もある。そこで魚体重の場合と同様に約 10 日毎の平均値で代表させた。

解析の方法

稚魚が摂餌し始め、yolk supply と無関係になると成長を開始し、比成長速度（体重に対しては日間増重量）は生理的サイクルによるものも含めて一般に変動するが、平均的には一定ないしは漸次減少しながら成長はおそらく全生涯を通じて連続する。魚体の大きさと年令の関係つまり成長曲線を解析した研究はこれまで非常に多いが、Medawar¹⁾ は基本式を次のように表現した。

$$d(\ln W)/dt = K\phi(t) \quad (1)$$

W は魚体の大きさ（体重でも体長でもよい）、 t は時間（多くの場合は年単位）。比較的長い期間の平均値を考慮した場合、一般に $K\phi(t)$ は正の量、 $\phi(t)$ は時間 t でもつて減少し、 $d\phi(t)/dt$ は t の増加につれて増し 0 に近づく。

ここで対象とする瀬戸内海地域では当オブリ（ハマチ）の短期養成にこれまでの魚体大きさと年令の関係式（この場合年平均の環境条件はほとんど変わらないと考えている）をそのまま適用したのでは十分でない。基礎環境条件としての水温の影響を考慮に入れて少し違った解析を試みることにする。

日間増重量はその時点における魚体重と水温に依存し、養魚場のその他の環境諸条件はすべて“普通の状態”で、餌料は量的に十分かつ質的に適正とし、魚が健康に育成しているものとする。生理的サイクルは無視する。

ブリの理論的最大体重を W_∞ （魚は家畜と違って成体になつても限度はあるが成長を続ける。このため問題はあるが便宜上これを考える）、体重 W 、時間 t （日数）とし、日間増重量を魚体重と水温の関数と考えて次のように表わされるものとしよう。

$$d\left(\frac{W}{W_\infty}\right)/dt = \lambda\left(1 - \frac{W}{W_\infty}\right)\left\{\ln\left(1 - \frac{W}{W_\infty}\right)^{-1}\right\}^\gamma \dots\dots\dots (2)$$

ただし γ は魚の種類によつてきまる定数、 λ は魚の種類と水温に関係するものとする。一般的には水温は時間の関数である。

$t = t_0$ から飼育を始め、そのとき $W = W_0$ であつたとすれば、式 (2) を積分して成長曲線式を得る。

$$W/W_\infty = 1 - \exp\left\{-\left[\left\{\ln\left(1 - \frac{W_0}{W_\infty}\right)^{-1}\right\}^{\frac{1}{\gamma}} + \frac{1}{n} \int_{t_0}^t \lambda dt\right]^n\right\} \dots\dots\dots (3)$$

$$= 1 - \exp\left\{-\left[\left\{\ln\left(1 - \frac{W_0}{W_\infty}\right)^{-1}\right\}^{\frac{1}{\gamma}} + \frac{t-t_0}{n} \bar{\lambda}\right]^n\right\} \dots\dots\dots (3')$$

ただし $n = \frac{1}{1-\gamma}$, $\bar{\lambda} = \frac{1}{t-t_0} \int_{t_0}^t \lambda dt$ である。

摂餌し始め成長が開始されたときから考えれば、 $t_0 = 0$ で $W_0 \sim 0$ とすればよい。また一定水温の条件下では $\lambda = \bar{\lambda} = \text{const.}$ とおけばよいこととなる。したがって成長が開始されたときから考え、しかも水温が一定であるとすれば、簡単に

$$W/W_\infty = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{\lambda}{n} t\right)^n\right\} \dots\dots\dots (4)$$

この式は粉体工学における Rosin-Rammler の粒径分布式と形式上同じである。実のところ式 (2) はこの Rosin-Rammler の分布式より推定して誘導したのである。なお (3) 式を t について微分すれば容易に

Medawar の一般式 $K\Phi(t)$ の関数形を示すことができる。

結果と考察

三谷・佐藤¹⁰⁾はブリの尾叉体長と年令の関係を研究し定差図にもとづいて理論最大尾叉体長を与えているので、これから対応する理論最大体重 W_∞ を推定した。 $W_\infty = 15.8 \times 10^3 \text{g}$ とする。

日間増重量が式 (2) のごとく表わされるとすれば、比較的狭い水温範囲に群別して $\left(1 - \frac{W}{W_\infty}\right)^{-1} \frac{d(W/W_\infty)}{dt}$ を $\log\left(1 - \frac{W}{W_\infty}\right)^{-1}$ に対して両対数紙上にプロットすれば平行直線群がえられるはずである。女木島 '62 年、櫃石島の '63 年、'64 年および畑中・村川³⁾の水槽飼育実験データ（生理上問題とされるものは除く）を使って計算した結果を Fig. 1 にしめす。このように比較的狭い水温範囲に群別すれば、ほぼ平行な直線群とみなして差支なく、したがってその勾配 γ は水温とは無関係で魚の種類によつてきまる定数と考えられるし、また λ は水温に依存することとも明らかである。ここでは $\gamma = 0.167$ となる。

次に λ が水温 θ によつてどのように変わるかを知るため、この γ 値を使つて式 (2) よりそれぞれ λ を求め、その時の水温に対してプロットしたのが Fig. 2 である。一般に経験的には次のことが知られている。すなわち、ハマチの養成には $20 \sim 29^\circ\text{C}$ が適温である。高温では 26°C を越すと摂餌が不活発になり、 30°C 以上になると注意を要し、 31°C 以上では遊泳が異常となり危険である。他方、低温では 14°C までは摂餌して成長するが、それ以下では摂餌はするが成長しなくなつて体重を減じる。 10°C では餌をとらなくなり、 10°C 以下に長くおくと衰弱死または斃死する^{2,9)}。

Fig. 2 における各点は予想されるようになりバラツキがあるけれども、fitted curve を描けばこの経験的記述によく合致することがわかる。 λ の値つまり魚体重が同じ場合の日間増重量は水温 14°C 前後で 0、 15°C から 19°C までは徐々に増し、 $20 \sim 24^\circ\text{C}$ の間はほぼ直線的に急増する。水温が 24°C を越すと λ の増し方が次第に小さくなつて $26 \sim 27^\circ\text{C}$ の間で最大となるようである。 28°C 以上では急激に減少する有様がうかがえるが、データが十分でないため断定できない。

干満潮差型のハマチ養魚場で夏季昼間下げ潮時かなり水温が上昇し $29 \sim 30^\circ\text{C}$ に達することがある。たとえ D. O. が普通であつても、この昇温は魚の成長に悪影響していることが言えそうである。

Fig. 1. Determination of γ in Eq. 2
(Temperature range: 26 ± 1.5 ,
 21 ± 1.5 , $15 \pm 2.0^\circ\text{C}$).

fig. 2. Dependence of λ in Eq. 2 upon
water temperature.

ここで得られた成長と水温の関係は、すでに Audigé が 2, 3 の魚について定性的に傾向として見出したものと一致する。しかし *Salmo trutta* についての実験ではこの傾向が少し異なってくるらしい。つまり成長速度に対する適温は 2 点にあらわれ、その前後および中間の温度領域では成長速度が低いという¹⁾。

結局瀬戸内海養成ハマチについて次のように要約される。養魚場の環境条件がすべて普通の状態で、給餌が質・量ともに十分、魚が健康に育成している場合について、ある時点における水温を知れば Fig. 2 より λ が定まり、その時の魚体重 W を知つて式 (2) から対応基準日間増重量を見積ることが可能となつた。Fig. 3 はこれをわかり易く図示したものである。また他方、養成初期の魚体重から出発して、養成期間中成長を阻害するような環境の変化が起こらない場合、水温変化に応じた基準成長は式 (3) から容易に推算される。したがつて逆に、ある養魚場での実際の日間増重量と前記の計算にしたがう対応基準日間増重量とを比較検討すれば、環境要因の影響の時期とその度合、飼育法の欠陥などを知ることができ、一つの指標として役立つことになる。

応 用

養成ハマチの成長を微分形つまり日間増重量曲線で表わしたのが Fig. 4 である。水温変化の模様を付した。実際の養成過程中的のある日の水温と魚体重から得られる対応基準日間増重量は、その日以前に成長を阻

Fig. 3. Standard growth rate calculated from Eq. 2.

Fig. 4. Comparisons of actual growth rate curves in Hi tsuishi and Megi fish farms (○) with standard growth rate curves (●): N_f presents the number of fishes produced.

む環境要因の作用がなければ、式 (3) により定められた基準成長曲線の微分形表示である基準日間増重量曲線上に位置することになる。しかしある日以前に成長を阻む環境変化を経験しても、それがさほど大きくなければ、その日の水温・魚体重から求まる対応基準日間増重量は初期魚体重に基づいて推定される基準日間増重量にほぼ等しいことは Fig. 3 から理解されよう。そこでそれぞれの日の対応基準日間増重量を示す点を結べば近似的に基準日間増重量曲線とみなしてよいことになる。Fig. 4 に対応基準日間増重量をプロットし、実際の養成績と比較対置した。

女木島の '62 年は全養成期間に渡りよく一致する。換言すれば基礎環境要因の水温が成長を支配していて、その他の要因はほぼ正常と思われる。つまり収容尾数が過密でなくまた良好な養魚場といえる。

櫃石島 '63, '64 年もよく一致するが、ただ 9 月下旬～10 月上旬にかけて、'63 年はかなり顕著に、'64 はごくわずかに日間増重量の部分的低下の現象を認める。これはおそらく成層消滅による上下層の混合ないしは表層水温低下に伴ってハマチが池底近くを遊泳し底質を攪乱浮上させ水質を悪化 (D. O. 消費, 有害ガスの発生など) するのが主因と推定してまず誤りはないだろう。これによる減重量つまり欠損面積は '63 年約 50 g, '64 年約 20 g と推算されるので、もし前記水質悪化がなければ 11 月下旬にはそれぞれ約 1.01 kg, 1.18 kg にまで育成していたであろう。このように考えても '63 年にはたかだか 1.0 kg 程度にしかなかったのは水温が 6 月下旬～10 月上旬の間全般に 1～2°C 低かつたことによる。ところが櫃石島 '62 年の成績をみると同様に 9 月下旬～10 月上旬の育成阻害現象が認められるが、それ以上に 7 月下旬頃より収容尾数の過多による D. O. の慢性的不足のあらわれを指摘し得る。かりに D. O. の慢性的不足だけで、9 月～10 月の水質悪化がなければ 30～40 g の増重となる。またこれらいずれもが起こらなければ約 220 g の増重となり、11 月下旬にはほぼ 1.05 kg の魚体重に育成していたであろう。この年は 6 月中旬～7 月中旬にかけて水温やや低く、8 月高過ぎたようである。

さきに井上・田中・斎藤⁷⁾は櫃石島養魚場の海水交流を研究し、小潮期の海水交流率から溶存酸素収支に基づいて適正収容尾数を論じたが、本報の成長解析はこれを十分補足するものである。

女木島は潮流流通型の典型的養魚場で中央に東西に縦貫したみお筋があり、これに沿って東流または西流の速い流れがたえずある。東流時にはこのみお筋の東端、西流時には西端隅で投餌するようにしているため、残餌・排泄物などは域外に流去すること多く、局所的な集中堆積がない。その上全面的に水変わりがよいため底質の悪化も極端ではない。したがって生産尾数約 24 万にかかわらず 9～10 月の育成阻止が顕著にあらわれないのであろう。しかし櫃石島では局部的深所があつてこの位置が投餌場になっている。その他は全体的にかなり浅い。このため残餌・排泄物の堆積が著しく、深所の水変わりも悪く底質が夏季にかなり悪化することが考えられる。'64 年は '63 年に引続いて収容尾数が少なかつたので、底質悪化の影響が小さかつたのであろう。

なお櫃石島では女木島に比べて 6～7 月に水温上昇が早く初期育成が早い、10 月前後から逆に水温下降が早くあらわれ後期育成をにぶらせる傾向がみられる。地理的考慮も忘れてはならぬ点である。

あ と が き

瀬戸内海地域の養成ハマチの成長を解析し、厳密ではないが基準日間増重量の一応の目安を樹立した。ハマチ養成施設の造成計画、環境診断、飼育法診断、生産量予知などに、そしてまた幾分は生態学上役立つものと思われる。

たとえば、(1) 収容尾数の過多による慢性的な D. O. の不足、あるいはプランクトンの極度の増減による一時的な D. O. の不均衡があつたのではない、(2) 水温が低すぎたり高すぎたりしたことの影響はどの程度か、(3) 底質がかなり老化していて、9 月・10 月の成層消滅期における上下層の混合、あるいは同じ頃表層の水温低下のためハマチが池底をほうくことによる底質の攪乱浮上に基因して D. O. が減じたり、硫化水素その他有害物が発生するような悪影響がみられたか、その他なんらかの環境要因の影響があつたか、などまた場合によっては、ある時期の餌料の質・量ならびに投餌方法が適切かどうか、8 月頃通常みられる

濁りはどの程度影響したか、などの多くの問題をその時点において考えさせ、単に定性的にとどまらずある程度定量的に原因・対策をさぐり出す手助けとなるであろう。さらに多くの資料を得て改良する余地はあるが、養魚技術を普遍化し確立するためには養魚の各種についてこのような基準のできることが望まれる。

大切な資料を提供いただきました厄介な種々の質問に親切にお答えいただきました櫃石島養魚場の中西社長、中村・大森両氏、女木島養魚場の山本社長の各位に心からお礼申し上げます。また東京大学杉二郎教授には御指導を賜り、本学岡市友利助教授には文献その他種々御世話になりました。付記して謝意を表します。

文 献

- 1) M. E. Brown: in "The physiology of fishes" (M. E. Brown, ed.), Vol. I, 361~398, Academic Press, New York. (1957).
- 2) 原田輝雄: "ハマチ", 大島他監修 "浅海養殖 60 種", 5~18, 大成出版社, 東京 (1965).
- 3) M. Hatanaka・G. Murakawa: *Tohoku J. Agr. Res.*, **9**, 69~79 (1958).
- 4) 畑中正吉・高橋正雄・村川五郎: 本誌, **24** (4), 251~255 (1958).
- 5) 石渡真典: 学位論文 "魚の摂餌量に関する研究" (1963).
- 6) 井上裕雄: 水産増殖臨時号 **4**, 61~77 (1965).
- 7) 井上裕雄・田中啓陽・斎藤 実: 本誌, **32** (5), 384~392 (1966).
- 8) 田中啓陽・井上裕雄・福田 清・前川忠夫: 香川大農学報, **8**, 投稿中 (1966).
- 9) 橘高二郎: 水産増殖, **7** (1), 7~30 (1959).
- 10) 三谷文夫・佐藤哲哉: 本誌, **24** (10), 803~808 (1959).
- 11) 田村 正: 水学雑, **54**, 40~47 (1949).